

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-249095

(43) 公開日 平成11年(1999) 9月17日

(51) Int.Cl.⁶

識別記号

F I

G 0 2 F 1/09

5 0 5

G 0 2 F 1/09

5 0 5

G 0 2 B 27/28

G 0 2 B 27/28

A

審査請求 未請求 請求項の数14 F D (全 13 頁)

(21) 出願番号

特願平10-67753

(22) 出願日

平成10年(1998) 3月3日

(71) 出願人 000237721

富士電気化学株式会社

東京都港区新橋5丁目36番11号

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号

(72) 発明者 河合 博貴

東京都港区新橋5丁目36番11号 富士電気化学株式会社内

(74) 代理人 弁理士 茂見 穂

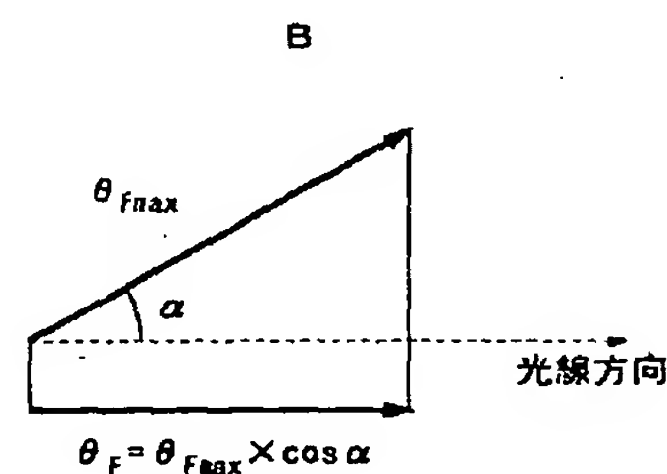
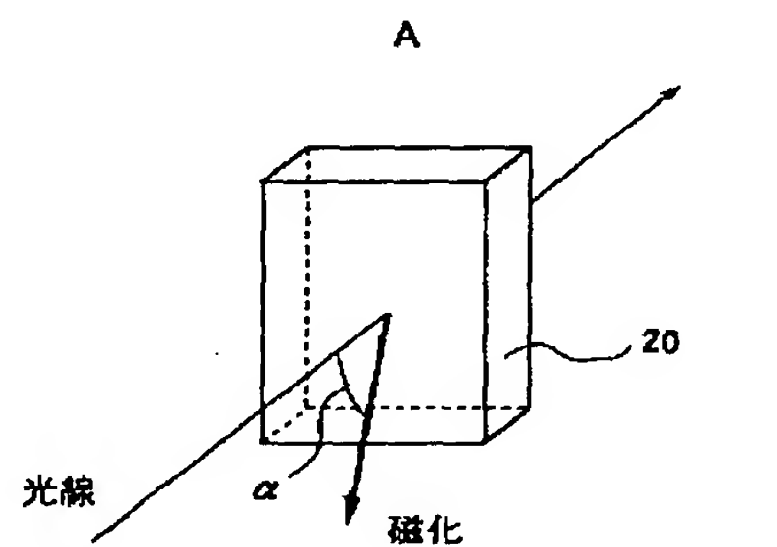
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ファラデー回転子

(57) 【要約】

【課題】 ファラデー回転子におけるファラデー回転角の温度依存性を小さくする。特に磁化方向が変化するような使用形態で温度特性の良好なファラデー回転子を使用した光デバイスを提供する。

【解決手段】 ファラデー素子20に外部磁界を印加することにより、ファラデー素子を透過する偏光の偏光面を回転させるファラデー回転子である。ファラデー素子の磁化方向と光線方向とのなす角を α とした時、角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量とが、互いに異符号で且つ一方の絶対値が他方の絶対値の2倍未満となる方向に外部磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくする。互いに異符号で且つ絶対値がほぼ等しくなる方向に外部磁界を印加する構成が最良である。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ファラデー素子に外部磁界を印加することにより、ファラデー素子を透過する偏光の偏光面を回転させるファラデー回転子において、

ファラデー素子の磁化方向と光線方向とのなす角を α とした時、角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量とが、互いに異符号で且つ一方の絶対値が他方の絶対値の 2 倍未満となる方向に外部磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくしたファラデー回転子。

【請求項 2】 単一もしくは複数の磁気光学結晶からなるファラデー素子に外部磁界を印加することにより、ファラデー素子を透過する偏光の偏光面を回転させるファラデー回転子において、

磁気光学結晶の磁化方向と光線方向とのなす角を α とした時、角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量とが、互いに異符号で且つ一方の絶対値が他方の絶対値の 2 倍未満となる単一方位に外部磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくしたファラデー回転子。

【請求項 3】 角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量とが、互いに異符号で且つ絶対値がほぼ等しい方向に外部磁界を印加する請求項 1 又は 2 記載のファラデー回転子。

【請求項 4】 複数の磁気光学結晶からなるファラデー素子に外部磁界を印加することにより、ファラデー素子を透過する偏光の偏光面を回転させるファラデー回転子において、

磁気光学結晶の方位を違えて配列し、各磁気光学結晶の磁化方向と光線透過方向とのなす角を α_1 , α_2 , \dots とした時、角度 α_1 , α_2 , \dots の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量との総和が、絶対値で各磁気光学結晶のファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量の総和以下となる方向に外部磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくしたファラデー回転子。

【請求項 5】 磁気光学結晶が、液相エピタキシャル法で作製した $(R B i)_3 (F e M)_5 O_{12}$ 又は $(R B i)_3 F e_5 O_{12}$ (但し R はイットリウムを含む希土類元素から選ばれた 1 種以上の元素、M は鉄と置換できる 1 種以上の元素) である請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載のファラデー回転子。

【請求項 6】 磁気光学結晶が $Y_3 F e_5 O_{12}$ である請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載のファラデー回転子。

【請求項 7】 ファラデー素子に外部磁界を印加することにより、ファラデー素子を透過する偏光の偏光面を回

転させるファラデー回転子において、

ファラデー素子である磁気光学結晶の組成が $T b_{1.00} Y_{0.65} B i_{1.35} F e_{4.05} G a_{0.95} O_{12}$ であり、その磁気光学結晶に対して、ステレオ投影図の中心の $(1 1 1)$ と最外周円上の $(-1 -1 2)$ 面から $(-1 0 1)$ 面へ 24 度の位置を結んだ線上に磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくしたファラデー回転子。

【請求項 8】 ファラデー素子に外部磁界を印加することにより、ファラデー素子を透過する偏光の偏光面を回転させるファラデー回転子において、

組成が $T b_{1.00} Y_{0.65} B i_{1.35} F e_{4.05} G a_{0.95} O_{12}$ でありほぼ同一厚さの磁気光学結晶を 3 個用いてファラデー素子とし、それらのうちの 2 個の磁気光学結晶に対しては、ステレオ投影図の中心の $(1 1 1)$ と最外周円上の $(1 1 -2)$ 面を結んだ線上に磁界を印加し、他の 1 個の磁気光学結晶に対しては、ステレオ投影図の中心の $(1 1 1)$ と最外周円上の $(-1 -1 2)$ 面を結んだ線上に磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくしたファラデー回転子。

【請求項 9】 光線方向に対し平行方向と垂直方向の二方向から永久磁石と電磁石とによって外部磁界を印加し、それらの合成磁界によりファラデー素子の磁化方向を光線方向に対して傾けた請求項 1 乃至 8 のいずれかに記載のファラデー回転子。

【請求項 10】 請求項 9 に記載のファラデー回転子を用い、電磁石の磁界を可変することにより、ファラデー回転角の温度依存性を制御するファラデー回転子の温度依存性制御方法。

【請求項 11】 請求項 1 乃至 9 のいずれかに記載のファラデー回転子を用いた光アイソレータ。

【請求項 12】 請求項 9 に記載のファラデー回転子を用い、該ファラデー回転子の光線方向の前後に偏光子と検光子を配置し、電磁石の磁界を、ファラデー回転角の温度依存性が最小になる値に設定した光アイソレータ。

【請求項 13】 請求項 1 乃至 9 のいずれかに記載のファラデー回転子を用いた光アッテネータ。

【請求項 14】 請求項 9 に記載のファラデー回転子を用い、該ファラデー回転子の光線方向の前後に偏光子と検光子を配置し、電磁石により外部磁界を可変することで透過光量を制御する光アッテネータ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光線方向に対してファラデー素子の磁化方向が斜めになるようにファラデー素子と外部磁界印加手段を配置したファラデー回転子に関し、更に詳しく述べると、ファラデー素子の磁化方向と光線方向とのなす角度 α の温度依存性を利用してファラデー回転角の温度変化量を低減したファラデー回転子に関するものである。このファラデー回転子は、光アッテネータや光アイソレータなど、ファラデー効果を利

用した各種の光デバイスに有用である。

【0002】

【従来の技術】光通信システムなどでは、光を一方向のみに透過させる光アイソレータや、光の透過光量を制御するための光アッテネータなどが必要であり、それらには透過光の偏光面を回転させるファラデー回転子が組み込まれている。その他、光スイッチ、光サーキュレータ、光フィルタ、光イコライザなど各種の光デバイスにもファラデー回転子が用いられている。

【0003】光アイソレータは、例えば図21に示すように、互いに45度傾いた偏光面をもつよう配置した偏光子1と検光子2との間に、45度ファラデー回転子3を挿入した構成である。ファラデー回転子3は、磁気光学結晶からなるファラデー素子と外部磁界印加手段である永久磁石との組み合わせであり、永久磁石による外部磁界を光線方向に一致するように印加して磁気光学結晶が磁氣的に飽和した状態とし、その状態で透過光の偏光面が45度回転する厚さに設計されている。光アイソレータの順方向に光を通した場合、偏光子1を通過した光は殆ど無損失で検光子2を通過する（図21のA参照）。それに対し逆方向の場合は、検光子2を通過した光はファラデー回転子3を通過することにより偏光面が偏光子1と直交するため、偏光子1を通過できない（図21のB参照）。この光アイソレータは偏光依存タイプであるが、この他に偏光無依存タイプもある（特願昭56-148290号）。

【0004】従来の光アッテネータの一例を図2に示す。図2のAに示すように、それぞれコリメートレンズ10、11を有する入力ファイバ12と出力ファイバ13との間に、楔形複屈折結晶（例えばルチルなど）からなる偏光子14と、ファラデー回転子15と、楔形複屈折結晶からなる検光子16を、この順序で光軸上に配置した構成である（特願平4-205044号参照）。ここでファラデー回転子15は、図2のBに示すように、ファラデー素子（磁気光学結晶）17と、それに90度異なる2方向から磁界を印加する永久磁石18と電磁石19との組み合わせからなる。ファラデー素子17の磁化方向は、永久磁石18による一定磁界と電磁石19による可変磁界との合成磁界の方向を向き、それに応じてファラデー回転角が変化する。

【0005】例えば偏光子14と検光子16を、それら両複屈折結晶の光学軸が互いに平行となるように配置した場合、次のように動作する。入力ファイバ12から出射し第1のレンズ10で平行ビームとなった光は、偏光子14により常光oと異常光eに分離する。常光oと異常光eの偏光方向は互いに直交している。そして、各々の光はファラデー回転子15を通過する際、光軸に平行方向の磁化の大きさに応じて偏光方向が回転し、それぞれ検光子16により常光o₁と異常光e₁、常光o₂と異常光e₂に分離する。検光子16から出射する常光o

と異常光e₂は互いに平行で、第2のレンズ11によって出力ファイバ13に結合する（実線で示す）が、検光子16から出射する異常光e₁と常光o₂は互いに平行ではなく広がるために、第2のレンズ11を通っても出力ファイバ13には結合しない（破線で示す）。

【0006】電磁石19による印加磁界が0の時、ファラデー回転角は90度（磁化が光軸と平行）であり、偏光子14から出射した常光oは検光子16から異常光e₁として出射し、偏光子14から出射した異常光eは検光子16から常光o₂として出射するため、第2のレンズ11を通っても出力ファイバ13には結合しない。それに対して電磁石19による印加磁界が十分大きいと、ファラデー回転角は0度に近づき、偏光子14から出射した常光oは殆どそのまま検光子16から常光o₁として出射し、偏光子14から出射した異常光eは殆どそのまま検光子16から異常光e₂とて出射するため、両光は平行で全て第2のレンズ11によって出力ファイバ13に結合する。このようにして電磁石19による印加磁界の強さに応じて、磁化が回転してファラデー回転角は約90度から約0度までの範囲で変化し、それに応じて出力ファイバ13に結合する光量が異なることになり、光アッテネータとして機能することになる。

【0007】なお偏光子14と検光子16の両複屈折結晶の光学軸が互いに直交するように配置した場合は、上記と反対に、ファラデー回転角が90度の場合に透過光量が最大となり、0度の場合には透過光量が最小となる。

【0008】なお、これらファラデー回転子に組み込むファラデー素子としては、近年、主にLPE法（液相エピタキシャル法）により作製したBi（ビスマス）置換希土類鉄ガーネット単結晶膜（LPE膜）が用いられている。その理由は、LPE膜はBiの寄与によってYIG（イットリウム鉄ガーネット）単結晶に比べてファラデー回転係数が大きい利点を有するからである。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかし、このBi置換希土類鉄ガーネット単結晶膜は、ファラデー回転角の温度依存性が大きいという欠点がある。そのため、ファラデー回転子の温度依存性も大きくなり、このファラデー回転子を用いて作製される光アイソレータや光アッテネータ等のデバイスの温度特性が大きいという問題が生じる。

【0010】そこで、この温度特性を改善するために、①特殊な組成系にすることにより、結晶の物性を改善する方法（特願昭60-243217号）

②磁気光学素子に2個のガーネット結晶を用いファラデー回転角の温度依存性を相殺させることにより、ファラデー回転子の温度依存性を改善する方法（特願昭60-134372号、特願平2-180757号）

③偏光子、検光子を最適配置とし、デバイスとして温度

特性を改善する技術（特願平 8-45231 号）が提案されている。

【0011】しかし、このような提案には、それぞれ次のような問題がある。①の方法は、磁気光学素子である Bi 置換希土類鉄ガーネットに Tb を添加することによりファラデー回転角の温度依存性を小さくしている。しかし、実施例の記載からすると、光アイソレータを構成するとき、最も温度依存性が小さい時の波長 $1.5 \mu\text{m}$ における磁気光学素子の厚みが約 $1700 \mu\text{m}$ となり、LPE 法による高品質の結晶育成が厚み $500 \mu\text{m}$ 程度が限界であることからすると非常に厚い。②の方法では、二つの異なる結晶を作製しなければならないため、コストが増大する。③の技術は、偏光面と検光子が直交状態である最大光減衰点（量）が偏光面の角度、言い換えればファラデー回転角に敏感であるのに対し、偏光面と検光子が平行状態である最大光透過点（量）がファラデー回転角に鈍感であることから、ファラデー回転角の温度変化量の絶対値が最も大きくなるファラデー回転角が最大るとき、偏光面と検光子が平行になり、ファラデー回転角の温度変化量の絶対値が最も小さくなるファラデー回転角が最小のとき、偏光面と検光子が直交状態になるようにして、最大光減衰量、挿入損失（最大光透過量）の温度依存性を小さくした光アッテネータを実現している。しかし、最大光減衰点はファラデー回転角に敏感なため、その点におけるファラデー回転角の温度依存性は非常に小さくしなければならないが、本質的にファラデー回転子に温度依存性があるために、温度依存性低減には限界がある。

【0012】本発明の目的は、新しい原理に基づいてファラデー回転角の温度依存性を低減する技術を提供することである。本発明の他の目的は、ファラデー回転角の温度依存性が小さいファラデー回転子を提供することである。本発明の更に他の目的は、温度特性の良好な光アッテネータなどのファラデー回転子を使用した光デバイスを提供することである。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明は、ファラデー素子に外部磁界を印加することにより、ファラデー素子を透過する偏光の偏光面を回転させるファラデー回転子である。本発明では、ファラデー素子の磁化方向と光線方向とのなす角を α とした時、角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量とが、互いに異符号で且つ一方の絶対値が他方の絶対値の 2 倍未満となる方向に外部磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくするように構成している。勿論、互いに異符号で且つ絶対値がほぼ等しくなる方向に外部磁界を印加することで、角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量とをほぼ相殺する構成が最良であ

る。

【0014】ファラデー素子は、単一もしくは複数の磁気光学結晶からなる。ファラデー素子が複数の磁気光学結晶からなる場合には、それらの方位を揃えて配列して外部磁界を印加する構成がある。即ち、各磁気光学結晶の磁化方向と光線方向とのなす角を α とした時、角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量とが、互いに異符号で且つ一方の絶対値が他方の絶対値の 2 倍未満となる単一方位に外部磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくする。

【0015】またファラデー素子が複数の磁気光学結晶からなる場合、それらの方位を違って配列して外部磁界を印加する構成もある。各磁気光学結晶の磁化方向と光線透過方向とのなす角を $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ とした時、角度 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量との総和が、絶対値で各磁気光学結晶のファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量の総和以下となる方向に外部磁界を印加し、ファラデー回転角の温度変化量を小さくする。

【0016】

【発明の実施の形態】ファラデー素子となる磁気光学結晶としては、例えば液相エピタキシャル法で作製した $(\text{R Bi})_3(\text{FeM})_5\text{O}_{12}$ 又は $(\text{R Bi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ （但し R はイットリウムを含む希土類元素から選ばれた 1 種以上の元素、M は鉄と置換できる 1 種以上の元素）がある。典型的には、 $\text{Tb}_{1.00}\text{Y}_{0.65}\text{Bi}_{1.35}\text{Fe}_{4.05}\text{Ga}_{0.95}\text{O}_{12}$ なる組成である。また $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ なる組成のガーネット単結晶でもよい。

【0017】本発明のファラデー回転子では、外部磁界は、ファラデー素子の磁化方向を光線方向から傾けるように印加する。例えば、一対の永久磁石、又は電磁石を、光線方向に対して斜めに配置する。あるいは光線方向に対して平行方向と垂直方向の 2 方向から磁界を印加する構成もある。例えば一方は永久磁石により、他方は電磁石により磁界を印加する。

【0018】上記のようなファラデー回転子は、光アイソレータ、光アッテネータ、光スイッチ、光サーキュレータ、光フィルタ、光イコライザなど、各種の光デバイスに利用できる。

【0019】

【発明の背景】図 1 の A に示すように、光がファラデー素子 20 を通過する際、ファラデー素子の磁化が光線方向から角度 α 傾いているとすると、ファラデー回転角 θ_F は、図 1 の B から分かるように、次の①式で表せる。

$$\theta_F = \theta_{F\max} \times \cos \alpha \quad \cdots \textcircled{1}$$

$\theta_{F\max}$ はファラデー回転角の最大値であり、磁化方向が光線方向に一致した場合である。偏光面は磁化の光線方向成分しか回転しない。ここで重要なことは、ファラデー

一素子の磁化方向は、外部からの印加磁界の他、磁気光学結晶の結晶磁気異方性による影響を受けるということである。つまり、 θ_{Fmax} のみならず、角度 α も温度 T の関数なのである。そこで、上記①式は次の②式のように*

$$d\theta_F / dT = \cos \alpha \times d\theta_{Fmax} / dT + \theta_{Fmax} \times (-\sin \alpha) \times d\alpha / dT \quad \dots \textcircled{2}$$

となる。ここで定数項を、
 $C_1 = \cos \alpha$

$$d\theta_F / dT = C_1 \times d\theta_{Fmax} / dT + C_2 \times d\alpha / dT \quad \dots \textcircled{3}$$

この右辺第1項はファラデー素子のファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の温度係数である。それに対して右辺第2項は、ファラデー素子の磁化方向と光線方向とのなす角度 α の温度依存性によるファラデー回転角の変化率をに対応しており、この角度 α の温度変化は主にファラデー素子である磁気光学結晶の結晶磁気異方性の温度依存性を起源としている。因に従来の光アイソレータで使用しているファラデー回転子の場合には、十分大きな外部磁界が光線方向に印加されており、ファラデー素子の磁化方向が常に光線方向に一致しているために、前記④の右辺第2項は常に零であり、材料の温度係数のみが問題となる。

【0020】上記のように、右辺第1項は物性で決まるため設計的に数値を動かすことはできないが、第2項は角度 α が含まれているため、結晶の方位によっては、その数値は符号も含めて大きくも小さくもできる。つまりファラデー素子の特定方位に磁化を向けるとことにより、右辺第1項と第2項の符号を反対にでき、それによってファラデー回転角の変化量をほぼ相殺し、ファラデー回転角の温度依存性を小さくすることが可能となる。

【0021】図3に示す測定系を作製し、ファラデー素子への外部磁界印加方向、電磁石の駆動電流値と温度を任意に変えて、直交偏光子法によりファラデー回転角を測定した。これは基本的に光アッテネータと同じ構成である。光ファイバ30から出射した光はレンズ31により平行光となり、偏光子32、ファラデー素子33、検光子34を通過し、レンズ35によって光ファイバ36の入射端に集光する。ここで符号38の部分ファラデー回転子であり、その一例を図4に示す。ファラデー素子33には一対の永久磁石40、41によって光軸に平行方向に飽和に要する磁界が印加され、電磁石42により光軸と垂直方向に磁界が印加されて、該電磁石42のコイル電流を変えることでそれらの合成磁界を変化させる。ファラデー素子にはガーネット単結晶を用いた。

【0022】まずファラデー素子となるガーネット単結晶は次のように作製した。 $PbO-B_2O_3-Bi_2O_3$ を融剤とし、液相エピタキシャル法(LPE法)により、格子定数が 12.496 \AA 、組成が $(CaGd)_3(MgZrGa)_5O_{12}$ である直径3インチ、厚み $1170 \mu m$ の基板の(111)面上に、Bi置換希土類鉄ガーネット単結晶(LPE膜、組成 $Tb_{1.00}Y_{0.65}Bi$

*表せる。

$$\theta_F(T) = \theta_{Fmax}(T) \times \cos \alpha(T) \quad \dots \textcircled{2}$$

②式より、ファラデー回転角の温度係数は、

$$\times C_2 = \theta_{Fmax} \times (-\sin \alpha)$$

※ とすると、上記③式は次のように表せる。

$$d\theta_F / dT = C_1 \times d\theta_{Fmax} / dT + C_2 \times d\alpha / dT \quad \dots \textcircled{4}$$

10 $1.35 Fe_{4.05} Ga_{0.95} O_{12}$ 、膜厚 $450 \mu m$)を育成した。図5に示すように、基板50には予め大小二つのフラット面(オリエンテーションフラット)が付けられており、大きなフラット面は(-110)面、小さなフラット面は(11-2)面である。LPE膜を符号52で示す。次に、得られたLPE膜を $7.6 mm \times 5.0 mm$ に切断し、研磨により基板を除去した後に、大気中で $1100^\circ C$ 、8時間熱処理した。これは、成長誘導による一軸磁気異方性定数を低減するためである。その後、再度研磨して、 $7.6 mm \times 5.0 mm \times 0.33 mm$ の形状に鏡面仕上げし、表裏両面の(111)面に反射防止膜を蒸着した。そして、 $1.0 mm \times 1.2 mm \times 0.33 mm$ に切断し、最後に(111)面と(-110)面と(-112)面の交点を少し削って方位の目印とした。最終的なガーネット単結晶の形状及び面を図5のDに示す。振動試料型磁力計(VSM)によりガーネット単結晶の飽和に要する磁化を測定したところ120エルステッドであったため、永久磁石による固定磁界を150エルステッドに設定して、ガーネット単結晶を飽和させるようにした。そして、光がガーネット単結晶の反射防止膜を蒸着した面、即ち(111)面に対して垂直に入射するようにして測定を行った。このガーネット単結晶の磁化が光線と平行方向を向いたときのファラデー回転角は約32度である。(なお、結晶の面及び方位を表す表記法では、負の指数についてはその数値の上に横棒を引いて表すが、本明細書ではそれができないために指数にマイナス符号を付して表記している。)

【0023】図6はガーネット単結晶の(111)面を中心としたステレオ投影図である。隣り合う同心円は互いに10度ずつ異なっている面を意味し、隣り合う径方向の線は互いに10度ずつ異なっている面を意味する。従って、ガーネット単結晶の任意の面は、このステレオ投影図内の点として示すことができる。

【0024】ガーネット単結晶には永久磁石により図6の紙面垂直方向の裏側から表側の方向で150エルステッドの磁界が印加され、それによって飽和している。この状態のところに、電磁石によりa方位<-112>、b方位<-112>方位から<-101>方位へ24度の方向、c方位<-101>、d方位<-211>に磁界を印加し、ファラデー回転角を測定した。測定は、温度が $10^\circ C$ 、 $25^\circ C$ 、 $65^\circ C$ の3点で行った。

【0025】ファラデー回転角の測定結果を図7～図10に示す。図7～図10を比較すると、印加磁界方向によってファラデー回転角のスペクトルが大きく異なっていることが分かる。これは、観測されるファラデー回転角が、ファラデー効果を起源とするものの寄与だけでなく、結晶の異方性を起源とするものも含んでいるためである。ガーネット単結晶は結晶磁気異方性を有しており、それによって〈111〉方位とその対称等価な方位が磁化容易軸であり、〈100〉方位とその対称等価な方位が磁化困難軸である。そして結晶磁気異方性の大きさは、低温になるほど大きくなる (P. Hansen等 Thin Solid Films, 114(1984)69-107)。

【0026】図7は〈-1-12〉方位に電磁石の磁界を印加した場合である。つまり、電磁石と永久磁石の合成磁界ベクトル経路は図6のaとなり、経路の中心付近、正確には(111)面から55度に(001)面がある。経路aの断面図を図11に示す。ガーネット単結晶60の磁化は、磁化容易軸である〈111〉方位と〈-1-11〉方位に向き易く、磁化困難軸の〈001〉方位に向き難い。その程度は、低温になるほど大きくなる。そのため、低温になるほど、〈001〉方位を急速に通過し、〈-1-11〉方位に近づくため、ファラデー回転角のスペクトルは図7に示すようになる。10℃と25℃のファラデー回転角が電磁石の磁界を大きくした時に符号が正から負になっているのは、磁化の光線方向成分が光線の進行方向に対し逆方向から正方向に変わったためである。図7において、電流値が15mA、20mA、25mAの3点では、ファラデー回転角の温度依存性が大きく異なっている。15mAの点ではファラデー回転角の温度係数は負であり、20mAではほぼ零で、25mAでは正である。

【0027】この現象は次のように説明できる。前述のようにファラデー回転角の温度係数は④式で決まる。④式の右辺第1項のファラデー効果を起源とする寄与は、ファラデー効果が温度上昇に伴い小さくなるので、ファラデー回転角は小さくなり、その温度係数、つまり右辺第1項は負となる。それに対し、異方性起源のファラデー回転角の温度係数である右辺第2項の寄与は、電流値が異なると電磁石と永久磁石の合成磁界ベクトル方向が異なる(つまりファラデー素子への印加磁界方向が変わる)ため、各点で異なる。15mAの点では、低温になるほど結晶の磁化が〈001〉方位に近づけないため、磁化の回転角 α は小さくなる。逆に言えば、温度が高いほど α は大きくなり、そのため第2項の温度係数は負になる。よって第1項と第2項の両方とも温度係数が負であり、観測されるファラデー回転角の温度係数 $d\theta_F/dT$ も負になる。25mAの点でも、低温になるほど結晶の磁化が〈001〉方位に近づけないが、既に通過しているため、磁化の回転角 α は大きくなる。逆に言えば、温度が高いほど α は小さくなる。そのため第2項の

温度係数は正になり、その大きさは第1項よりも大きい。ため、観測されるファラデー回転角の温度係数 $d\theta_F/dT$ は正になる。これらに対し、20mAの点では第2項は正であり、しかもその大きさが第1項とほぼ同じであるため、温度係数は相殺されてほぼ零になる。

【0028】図8は〈-1-12〉方位から〈-101〉方位へ24度の方向に電磁石の磁界を印加した場合である。つまり、電磁石と永久磁石の合成磁界ベクトルの経路は図6のbとなる。経路上には磁化容易軸や磁化困難軸は無いが、近くに〈001〉方位がある。この影響により、④式の右辺第1項と第2項が相殺され、ファラデー回転角が10℃、25℃、65℃でほぼ同じ値になっている。

【0029】図9は〈-101〉方位に電磁石の磁界を印加した場合である。つまり、電磁石と永久磁石の合成磁界ベクトル経路は図6のcで、磁化容易軸や磁化困難軸から最も離れており、且つ最寄りの磁化容易軸や磁化困難軸がこの経路から対称的に位置している。例えば、最寄りの磁化容易軸の〈-1-11〉と〈-111〉、あるいは磁化困難軸の〈001〉と〈-100〉は、経路cが対称軸となるとともに位置している。そのため、結晶の磁化方向は異方性の影響を殆ど受けず、電磁石と永久磁石の磁界の合成ベクトル方向に追従している。温度係数では、第2項の寄与は殆ど無く、第1項の寄与によって負となっている。

【0030】図10は〈-211〉方位に電磁石の磁界を印加した場合である。つまり、電磁石と永久磁石の合成磁界ベクトル経路は図6のdとなり、中心の(111)面から70度の位置に(-111)面がある。低温になるほど磁化は〈111〉方位と〈-111〉方位に向き易くなる。〈-111〉方位に結晶の磁化が向いている場合のファラデー回転角は、磁化が光線方向を向いている時のファラデー回転角 $\times \cos 70 = 32 \text{度} \times \cos 70 = 11 \text{度}$ である。図10のスペクトルが図9のスペクトルに比べて電流値が大きい側でのファラデー回転角が大きいのは、結晶の磁化が〈-111〉方位付近に向いているためである。

【0031】このようにガーネット単結晶の特定方向に磁界を印加することにより、第1項と第2項の符号を反対にでき、それによってファラデー回転角の変化量が相殺してファラデー回転角の温度依存性を小さくすることができる。また、その手段としては、図7、図8のように単一のある特定方向に磁界を印加してもよいし、また図7～図10のスペクトルが大きく異なっていることから、ファラデー素子に複数のガーネット単結晶を用いて、各々の結晶の任意の方位に磁界を印加し、それらの総和のファラデー回転角の温度依存性が小さくなるようにしてもよい。

【0032】なお、結晶の対称性から、図6において、経路aの〈-1-12〉方位に電磁石の磁界を印加した場合

と、その対称等価な方位、つまり $\langle -1-12 \rangle$ 方位から 120° に位置する $\langle -12-1 \rangle$ 方位と $\langle 2-1-1 \rangle$ 方位に磁界を印加した場合は、ファラデー回転角の振る舞いは同じになる。同様に、経路 b ~ d においても、対称等価な方位では同じ結果になる。

【0033】

【実施例】（実施例 1）図 3 に示す測定系を作製し、はじめに直交偏光子法によりファラデー回転角の温度特性を測定した。次に、偏光子と検光子を、それらを通過する光の偏光面のなす角度が 135° になるように固定して、光減衰量の温度特性を測定した。永久磁石の磁界は 150 エルステッドであり、電磁石の駆動電流値は 20 mA で固定した。この測定系は基本的に光アイソレータと同じであり、光減衰量は逆方向挿入損失に相当する。

【0034】ファラデー素子となるガーネット単結晶は図 5 に示すような手順で作製した。PbO-B₂O₃-Bi₂O₃ を融剤とし、LPE 法により、格子定数が 12.496 \AA 、組成が (CaGd)₃(MgZrGa)₅O₁₂ である直径 3 インチ、厚み $1170 \mu\text{m}$ の基板の (111) 面上に、Bi 置換希土類鉄ガーネット単結晶 (LPE 膜、組成 Tb_{1.00}Y_{0.65}Bi_{1.35}Fe_{4.05}Ga_{0.95}O₁₂、膜厚 $450 \mu\text{m}$) を育成した。図 5 に示すように、基板には予め大小二つのフラット面が付けられており、大きなフラット面は (-110) 面、小さなフラット面は $(11-2)$ 面である。次に、得られた LPE 膜を $7.6 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ に切断し、研磨により基板を除去した後、大気中で 1100°C 、8 時間熱処理した。これは、成長誘導による一軸磁気異方性定数を低減するためである。その後、再度研磨して、 $7.6 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$ の形状に鏡面仕上げし、表裏両面の (111) 面に反射防止膜を蒸着した。そして、 $1.0 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$ に切断し、最後に (111) 面と (-110) 面と $(-1-12)$ 面の交点を少し削って方位の目印とした。振動試料型磁力計 (VSM) によりガーネット単結晶の飽和に要する磁化を測定したところ 120 エルステッドであったため、永久磁石による固定磁界を 150 エルステッドにして、ガーネット単結晶を飽和させるようにした。そして、光がガーネット単結晶の反射防止膜を蒸着した面、即ち (111) 面に対して垂直に入射するようにして測定を行った。

【0035】図 12 の A に示すように、ファラデー素子 70 は、上記のような磁性ガーネット単結晶 72 を 3 個、方位を揃えて並べて、角を面取りした側の $(-1-12)$ 面を電磁石の S 極側に配置した。つまり、電磁石の磁界は $\langle -1-12 \rangle$ 方位に印加される。このことは、図 7 の経路 a における電磁石の電流値 20 mA の場合に相当する。ガーネット単結晶は、磁化が光線と平行方向を向いたとき約 34° のファラデー回転角を有するものであり、ファラデー素子としては $34^\circ \times 3 \text{ 個} = 102^\circ$ のファラデー回転角を有するものである。ここでガーネッ

ト単結晶を 3 個使用しているのは、育成した結晶の膜厚が $450 \mu\text{m}$ であり、それを加工して用いているため膜厚が薄くなり、1 個当たりのファラデー回転角が小さいためである。現時点では LPE 法による結晶育成は、膜厚が $500 \mu\text{m}$ を超えると、欠陥や割れが生じて育成が困難である。しかし、将来的に育成技術が進歩して $500 \mu\text{m}$ を超える厚い膜の育成が可能になり、加工後の結晶 1 個当たりの厚みを大きくしてファラデー回転角を大きくできれば、使用するガーネット単結晶の個数は 2 個乃至 1 個で構わない。

【0036】ガーネット単結晶には電磁石により光線方向と垂直の磁界が印加され、永久磁石により光線方向と平行の磁界が印加される。ファラデー回転角の測定結果を図 13 に、光減衰量の測定結果を図 14 に示す。これらの図から、実施例 1 はファラデー回転角と光減衰量の温度依存性は小さく、光アイソレータとして使用した場合、有効であることが分かる。実際に光アイソレータを作製する場合には、本実施例のように永久磁石と電磁石を用いて磁性ガーネット単結晶の磁化を光軸から傾けてもよいし、一対の永久磁石を光軸に対して斜めに配置させて磁性ガーネット単結晶の磁化を光軸から傾けてもよいし、1 個の円筒状の永久磁石を光軸に対して斜めに置き、その中に磁性ガーネット単結晶を蒸着面である (111) 面が光軸と垂直になるように置き、磁性ガーネット単結晶の磁化を光軸から傾けてもよい。いずれの場合も効果は同じで、ファラデー回転角の温度依存性は小さくなる。

【0037】図 13 及び図 14 において、比較 A は次の手順で作製、測定したものである。ファラデー素子は、実施例 1 で用いたものと同じ磁性ガーネット単結晶を厚み 0.233 mm にしたものを 2 個使用し、磁化方向が光線方向と平行方向を向いたとき約 45° のファラデー回転角を有するものである。ファラデー回転角と光減衰量は、図 3 の測定系から電磁石を除き永久磁石の磁界のみを結晶に印加して測定した。また磁性ガーネット単結晶は 2 個とも、光線がガーネット単結晶の反射防止膜を蒸着した面、即ち (111) 面に対して垂直に入射するように配置されている。永久磁石により、磁性ガーネット単結晶の磁化は飽和されており、その方向は光軸と平行になっている。はじめに直交偏光子法によりファラデー回転角の温度特性を測定した。次に偏光子と検光子を、それらを通過する光の偏光面のなす角度が 135° になるように固定して光減衰量の温度特性を測定した。この測定系は、基本的に従来の光アイソレータと同じであり、光減衰量は逆方向挿入損失に相当する。

【0038】（実施例 2）ガーネット単結晶は（実施例 1）と同じ手順で作製した。但し、寸法は $1.0 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm} \times 0.33 \text{ mm}$ であり、磁化が光線方向と平行方向を向いたとき約 32° のファラデー回転角を有するものである。図 3 の測定系を使用し、はじめに直交偏光子

法によりファラデー回転角の温度依存性を測定した。次に、偏光子と検光子を、通過する光の偏光面のなす角度が105度になるように設置して、光減衰量の温度特性を測定した。永久磁石の磁界は150エルステッドであり、電磁石の駆動電流値は0～80mAで可変した。この測定系は、基本的に光アッテネータと同じである。図12のBに示すように、ファラデー素子74は、上記で作製した磁性ガーネット単結晶72を3個、方位を変えて並べ、一番手前のガーネット単結晶の面取りした側の(-1-12)面を電磁石のS極側に、後ろの2個のガーネット単結晶の面取りした側の(-1-12)を電磁石のN極側にして配置した。ガーネット単結晶には電磁石により光線方向と垂直の磁界を印加し、永久磁石により光線方向に平行方向の磁界を印加する。このことは、後ろの2個のガーネット単結晶に対しては、ステレオ投影図の中心の(111)と最外周円上の(11-2)面を結んだ線上に磁界を印加し、一番手前の1個の磁気光学結晶に対しては、ステレオ投影図の中心の(111)と最外周円上の(-1-12)面を結んだ線上に磁界を印加することを意味している。

【0039】ファラデー回転角の測定結果を図15に、また光減衰量の測定結果を図16に示す。図15より、電磁石の電流値が大きいところでのファラデー回転角の温度依存性の小さいことが分かる。また、図16より、光減衰量の温度依存性が小さいことも分かる。これらの結果から、この構成は、磁気光学式可変光アッテネータに有効である。

【0040】(実施例3)ガーネット単結晶は(実施例1)と同じ手順で作製した。但し、寸法は1.0mm×1.2mm×0.33mmであり、磁化が光線方向と平行方向を向いたとき約32度のファラデー回転角を有するものである。図3の測定系を使用し、はじめに直交偏光子法によりファラデー回転角の温度依存性を測定した。次に、偏光子と検光子を、通過する光の偏光面のなす角度が105度になるように設置して、光減衰量の温度特性を測定した。永久磁石の磁界は150エルステッドであり、電磁石の駆動電流値は0～80mAで可変した。この測定系は、基本的に光アッテネータと同じである。図12のAのように、ファラデー素子70は、上記で作製した磁性ガーネット単結晶72を3個、方位を揃えて並べ、電磁石の磁界を<-1-12>方位から<-101>方位へ24度の方向に印加した。ガーネット単結晶には電磁石により光線方向と垂直の磁界を印加し、永久磁石により光線方向に平行方向の磁界を印加する。このことは磁気光学結晶に対して、ステレオ投影図の中心の(111)と最外周円上の(-1-12)面から(-101)面へ24度の位置を結んだ線上に磁界を印加することを意味している。

【0041】ファラデー回転角の測定結果を図17に、また光減衰量の測定結果を図18に示す。図17より、

ファラデー回転角の温度依存性の小さいことが分かる。また図18より、光減衰量の温度依存性が小さいことも分かる。これらの結果から、この構成は、磁気光学式可変光アッテネータに有効である。

【0042】(参考例1)ガーネット単結晶は(実施例1)と同じ手順で作製した。但し、寸法は1.0mm×1.2mm×0.33mmであり、磁化が光線方向と平行方向を向いたとき約32度のファラデー回転角を有するものである。図3の測定系を使用し、はじめに直交偏光子法によりファラデー回転角の温度依存性を測定した。次に、偏光子と検光子を、通過する光の偏光面のなす角度が105度になるように設置して、光減衰量の温度特性を測定した。永久磁石の磁界は150エルステッドであり、電磁石の駆動電流値は0～80mAで可変した。この測定系は、基本的に光アッテネータと同じである。ファラデー素子は、上記で作製したガーネット単結晶を3個、図12のAのように方位を揃えて並べ、(-110)面を電磁石のS極側にして配置した。つまり、電磁石の磁界は<-110>方位に印加される。ガーネット単結晶には電磁石により光線方向と垂直の磁界を印加し、永久磁石により光線方向に平行方向の磁界を印加する。

【0043】ファラデー回転角の測定結果を図19に、また光減衰量の測定結果を図20に示す。図19及び図20より、ファラデー回転角及び光減衰量の温度依存性が大きいことが分かる。これらの結果から、この構成は、磁気光学式可変光アッテネータとしては不適當である。

【0044】

【発明の効果】本発明は、上記のようにファラデー素子となる磁気光学結晶の結晶磁気異方性の温度依存性を利用することにより、磁気光学結晶の磁化方向と光線方向とのなす角度の温度依存性によるファラデー回転角の変化量と、ファラデー効果の温度依存性によるファラデー回転角の変化量が極力相殺されるように構成でき、その結果として磁化方向が変化するような使用形態においてもファラデー回転角の温度変化量を低減できる効果が生じる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明における磁性ガーネット単結晶と磁化方向との関係を示す説明図。

【図2】従来の光アッテネータの一例を示す説明図。

【図3】本発明で用いる測定系の説明図。

【図4】そのファラデー回転子の一例を示す説明図。

【図5】磁性ガーネット単結晶の製造工程と最終製品形状と方位の説明図。

【図6】磁性ガーネット単結晶の(111)面を中心としたステレオ投影図。

【図7】経路aでの電流値とファラデー回転角の関係を示すグラフ。

【図8】経路bでの電流値とファラデー回転角の関係を

示すグラフ。

【図 9】経路 c での電流値とファラデー回転角の関係を示すグラフ。

【図 10】経路 d での電磁石の電流値とファラデー回転角の関係を示すグラフ。

【図 11】経路 a での磁界、磁化の方向と結晶方位の関係を示す断面図。

【図 12】ファラデー素子を構成する磁性ガーネット単結晶の配列方位の説明図。

【図 13】実施例 1 と比較 A における温度とファラデー回転角の関係を示すグラフ。

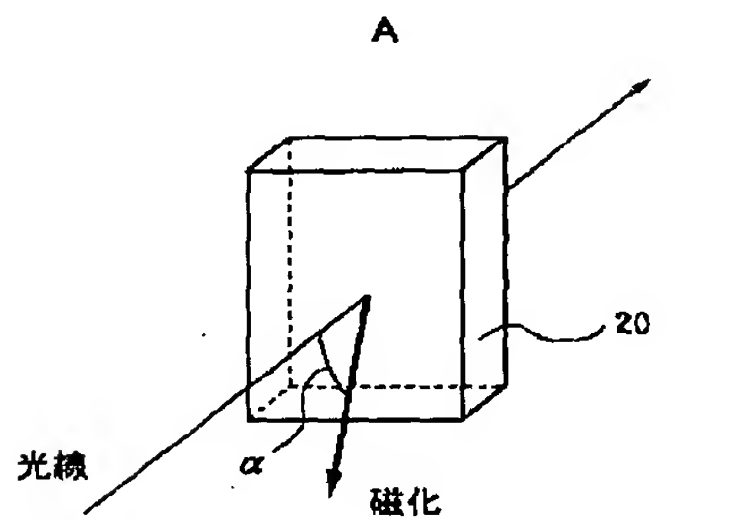
【図 14】実施例 1 と比較 A における温度と光減衰量の関係を示すグラフ。

【図 15】実施例 2 における電磁石の電流値とファラデー回転角の関係を示すグラフ。

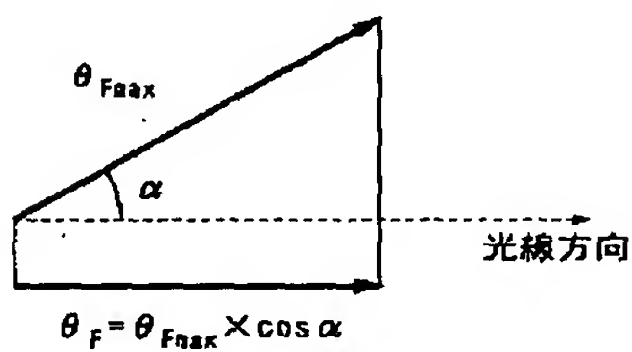
【図 16】実施例 2 における電磁石の電流値と光減衰量の関係を示すグラフ。

【図 17】実施例 3 における電磁石の電流値とファラデー回転角の関係を示すグラフ。

【図 1】



B



【図 18】実施例 3 における電磁石の電流値と光減衰量の関係を示すグラフ。

【図 19】参考例 1 における電磁石の電流値とファラデー回転角の関係を示すグラフ。

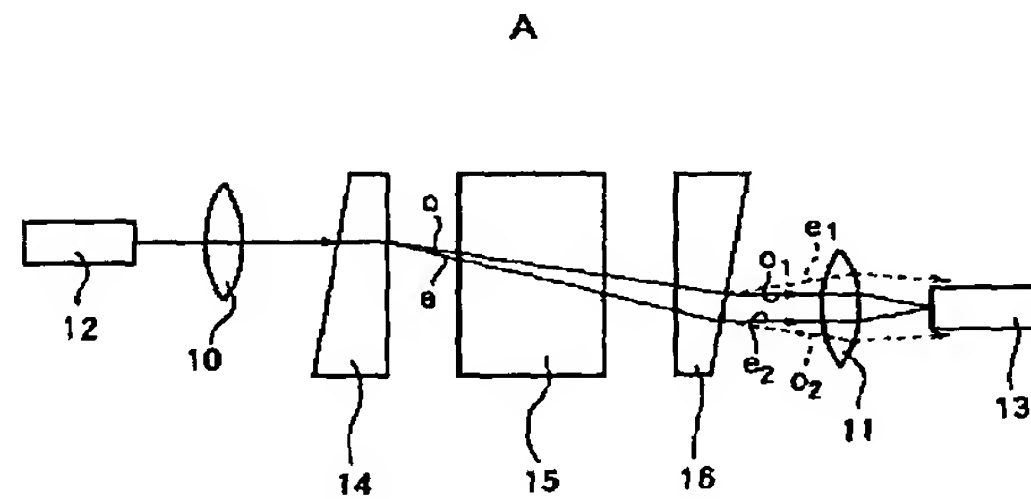
【図 20】参考例 1 における電磁石の電流値と光減衰量の関係を示すグラフ。

【図 21】光アイソレータの一例を示す構成説明図。

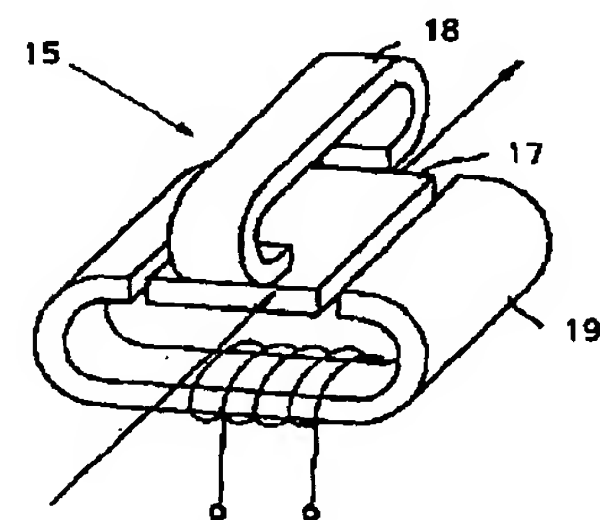
【符号の説明】

- 20 ファラデー素子
- 30 光ファイバ
- 31 レンズ
- 32 偏光子
- 33 ファラデー素子
- 34 検光子
- 35 レンズ
- 36 光ファイバ
- 38 ファラデー回転子
- 40 永久磁石
- 42 電磁石

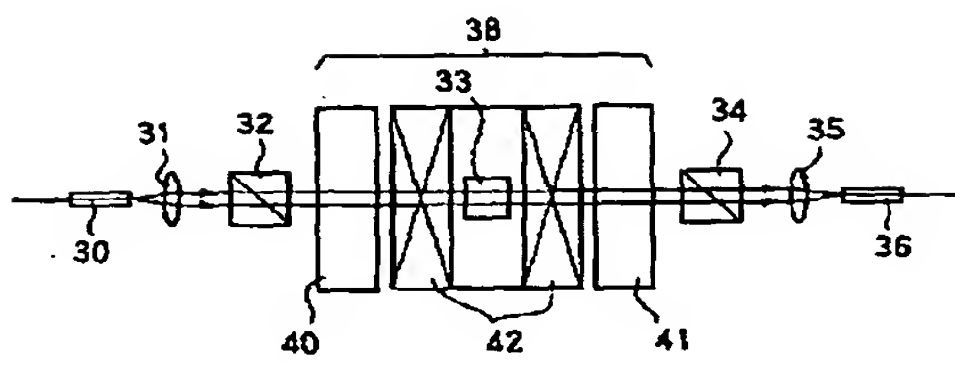
【図 2】



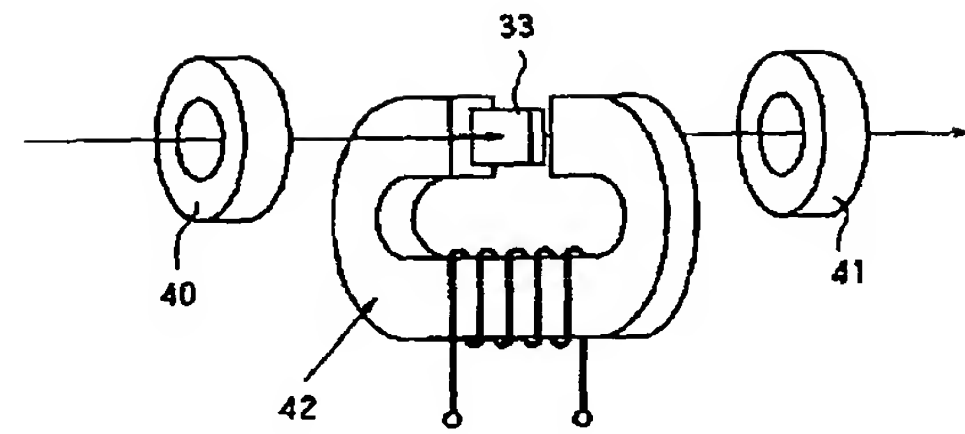
B



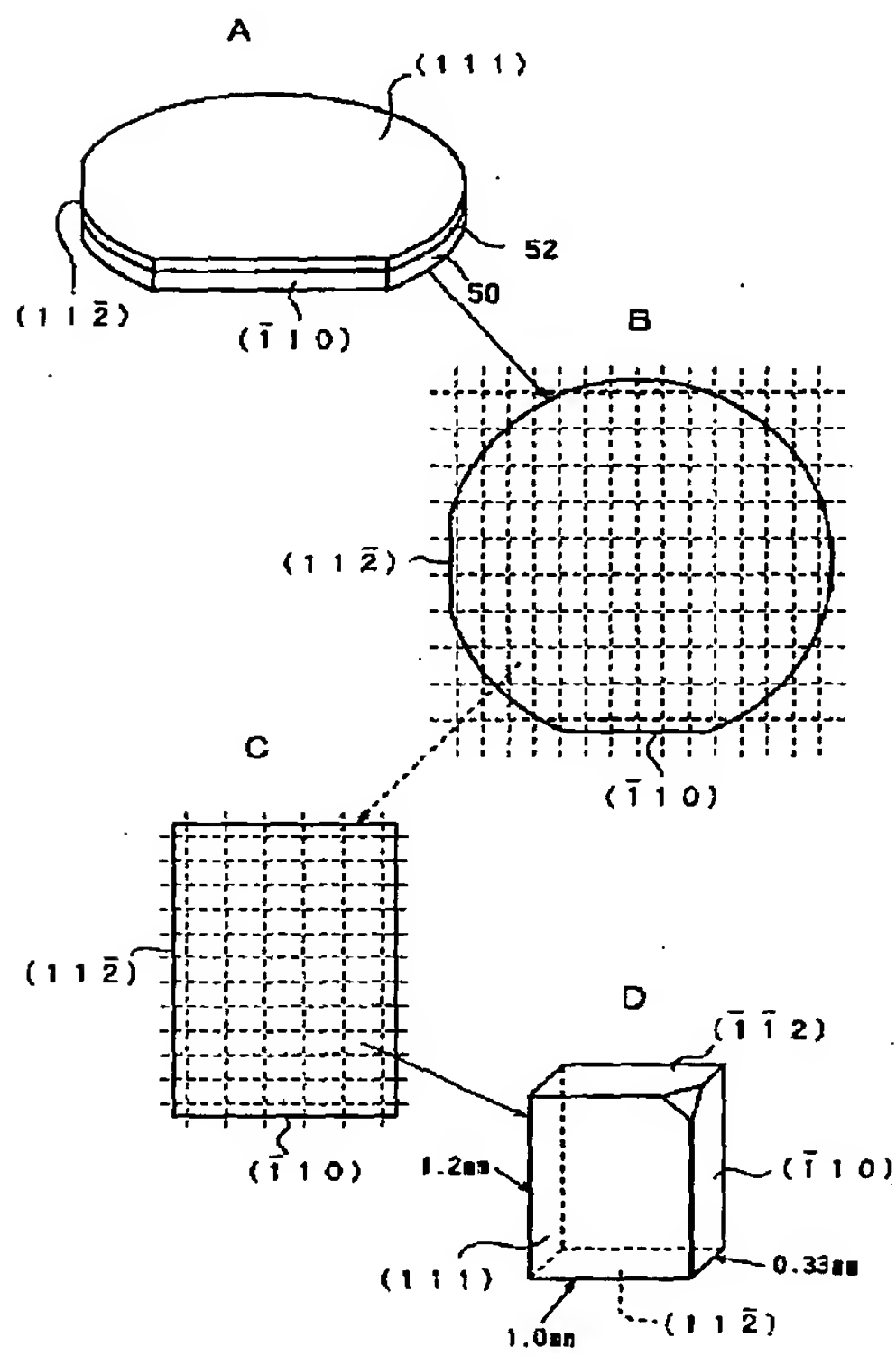
【図 3】



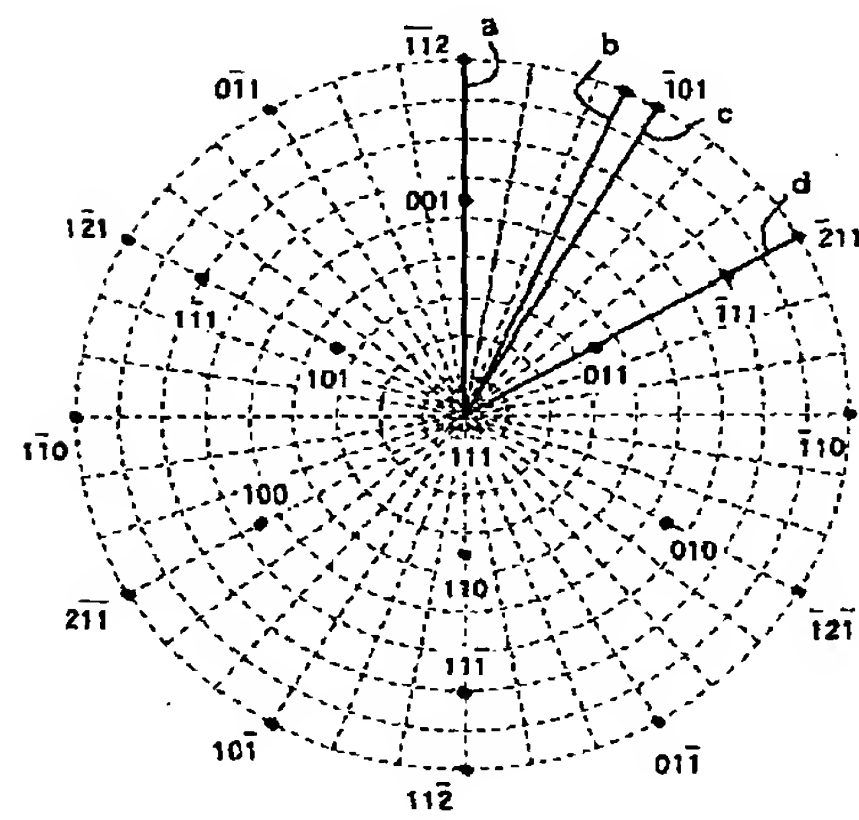
【图 4】



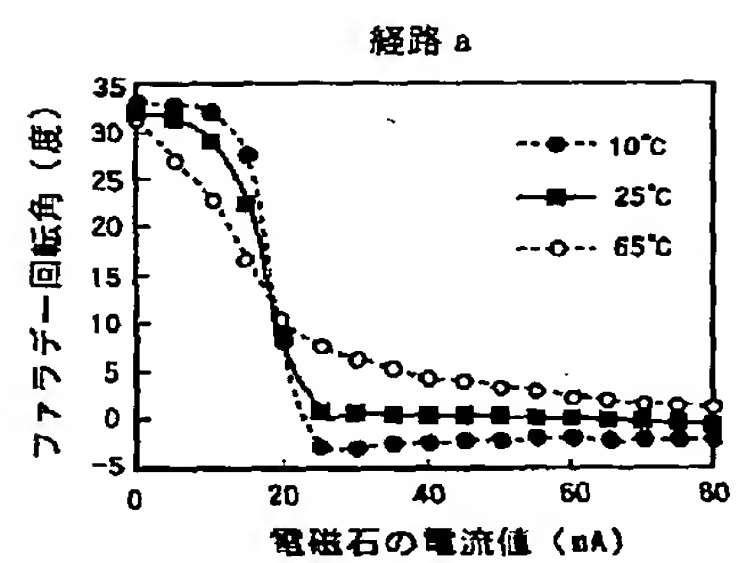
【图 5】



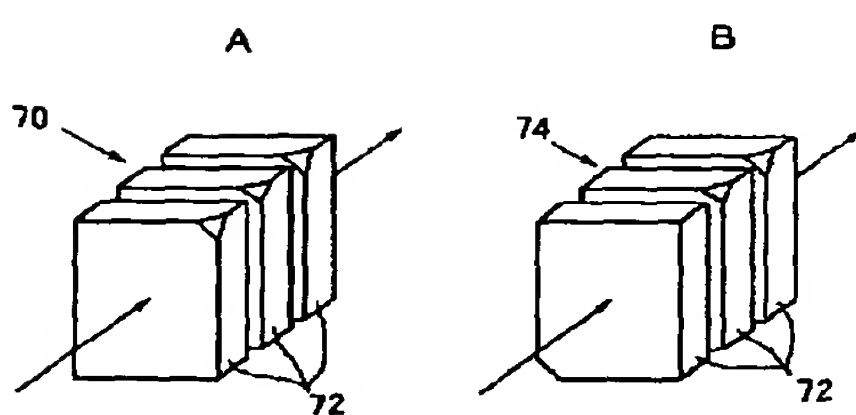
【图6】



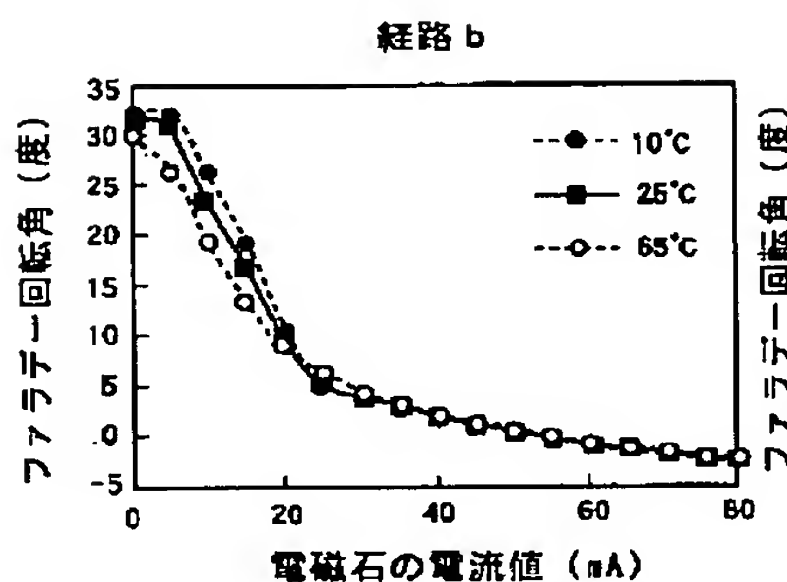
【図7】



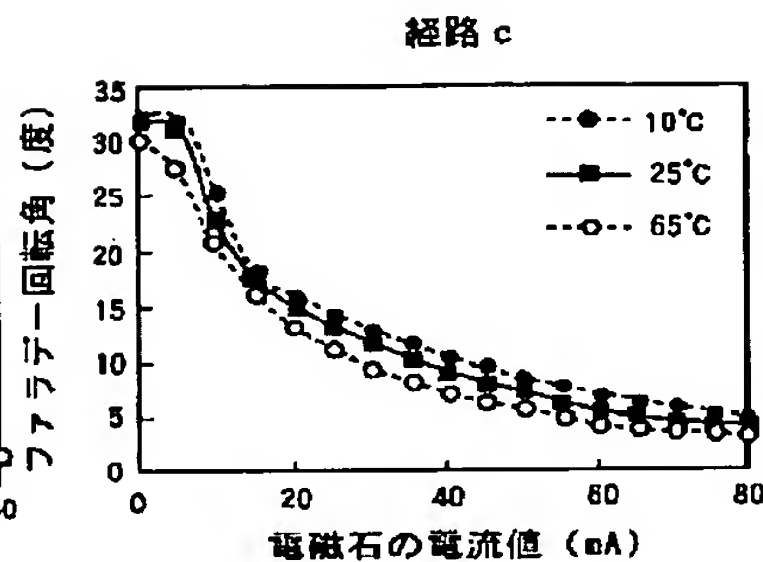
【图 1 2】



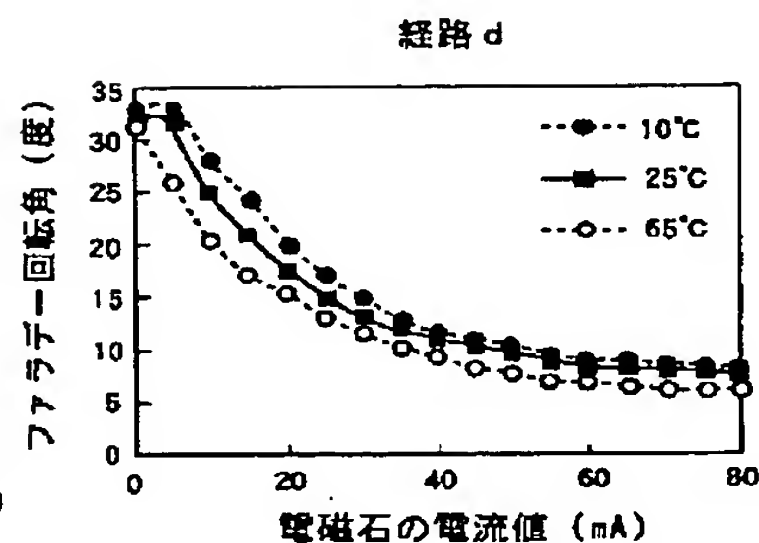
【図8】



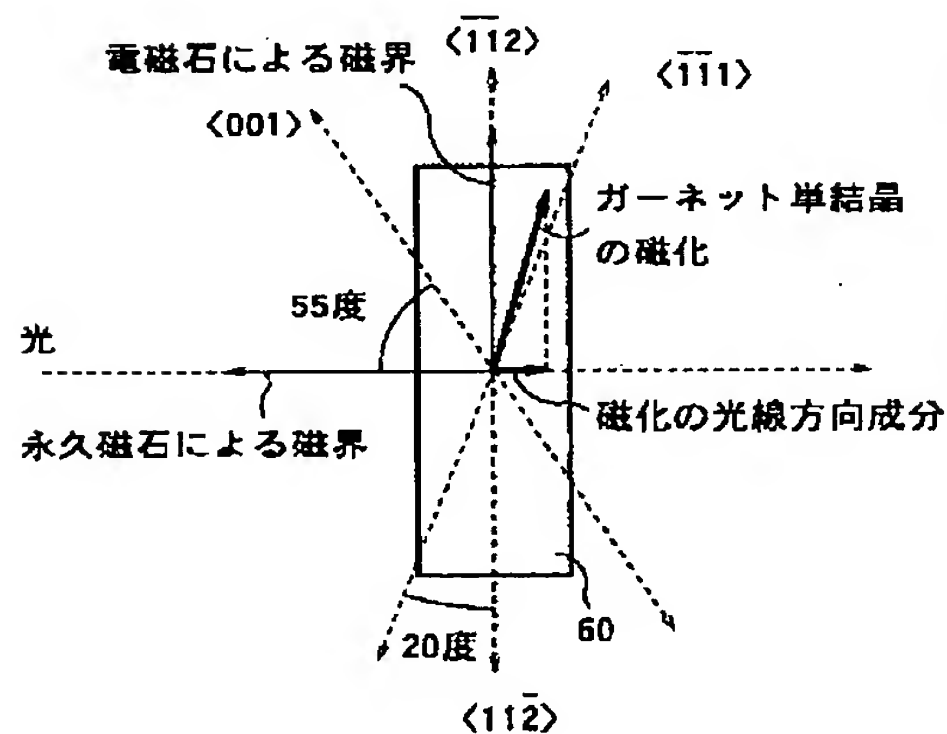
【図9】



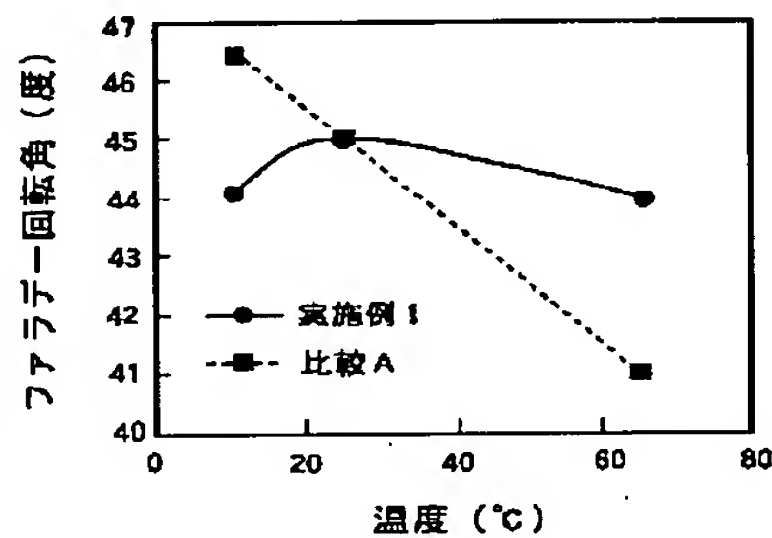
【図10】



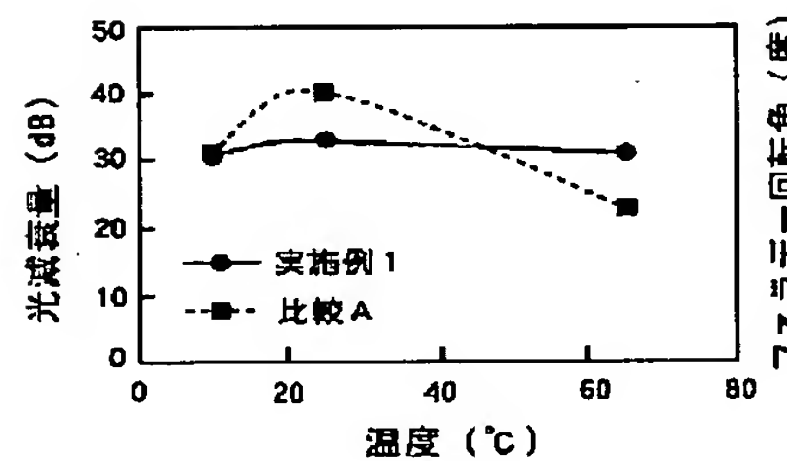
【図11】



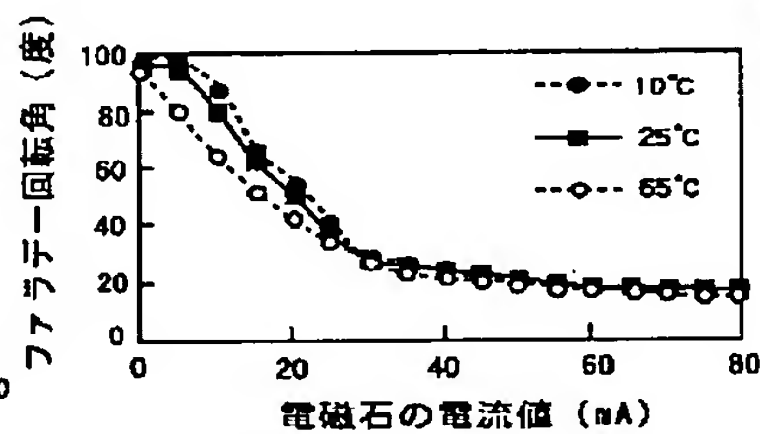
【図13】



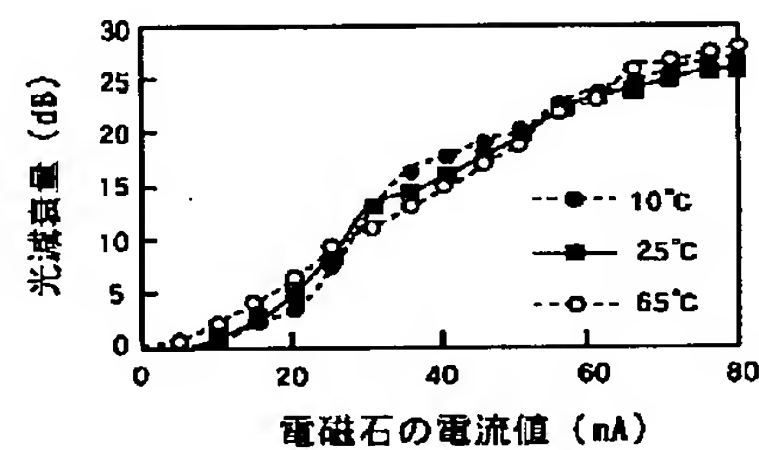
【図14】



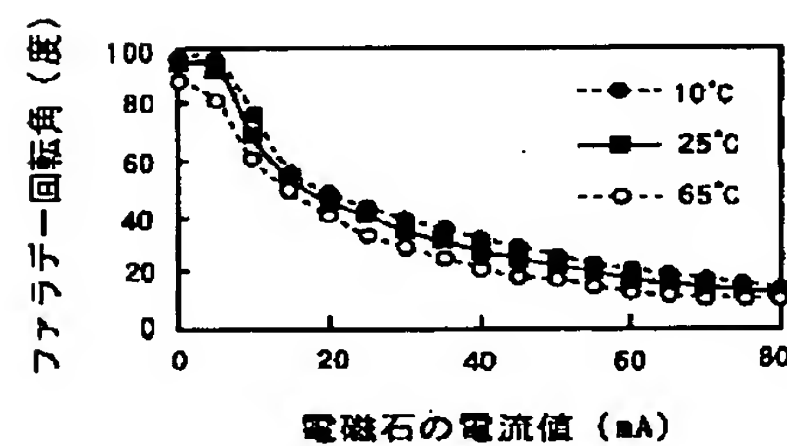
【図15】



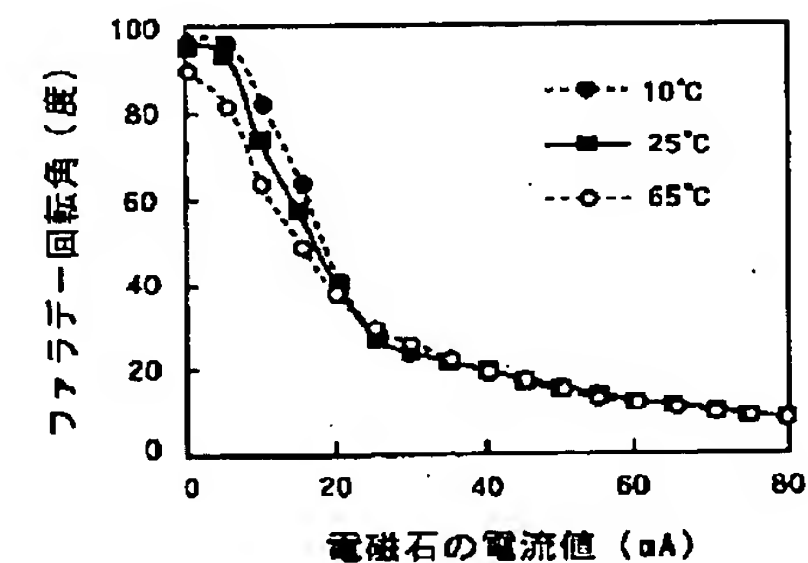
【図16】



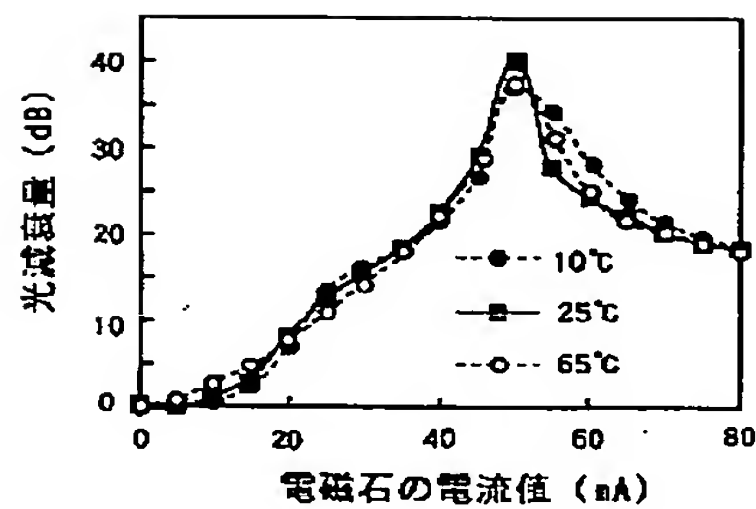
【図19】



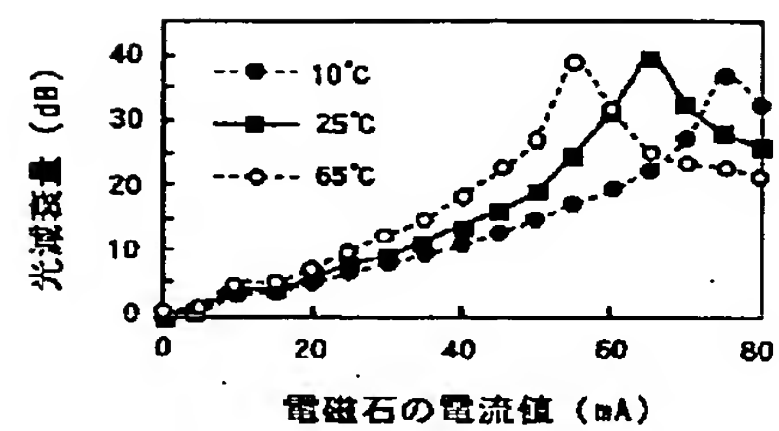
【図17】



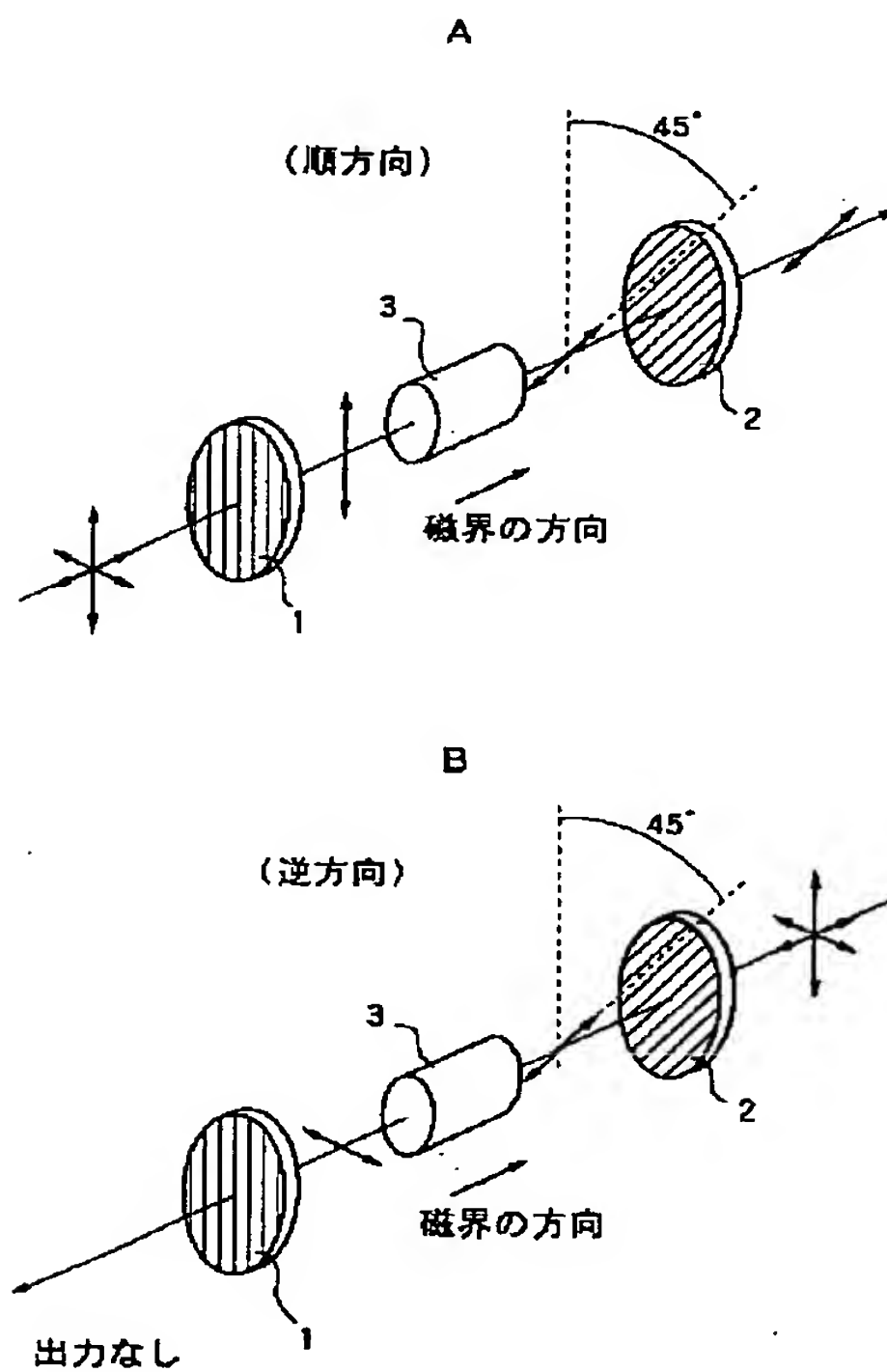
【図18】



【図20】



【図21】



【手続補正書】

【提出日】平成10年4月13日

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0022

【補正方法】変更

【補正内容】

【0022】まずファラデー素子となるガーネット単結

晶は次のように作製した。 $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Bi}_2\text{O}_3$ を融剤とし、液相エピタキシャル法(LPE法)により、格子定数が 12.496\AA 、組成が $(\text{CaGd})_3(\text{MgZrGa})_5\text{O}_{12}$ である直径3インチ、厚み $1170\mu\text{m}$ の基板の(111)面上に、Bi置換希土類鉄ガーネット単結晶(LPE膜、組成 $\text{Tb}_{1.00}\text{Y}_{0.65}\text{Bi}_{1.35}\text{Fe}_{4.05}\text{Ga}_{0.95}\text{O}_{12}$ 、膜厚 $450\mu\text{m}$)を育成し

た。図 5 に示すように、基板 5 0 には予め大小二つのフラット面（オリエンテーションフラット）が付けられており、大きなフラット面は（-1 1 0）面、小さなフラット面は（1 1 -2）面である。L P E 膜を符号 5 2 で示す。次に、得られた L P E 膜を 7. 6 mm × 5. 0 mm に切断し、研磨により基板を除去した後に、大気中で 1 1 0 0 °C、8 時間熱処理した。これは、成長誘導による一軸磁気異方性定数を低減するためである。その後、再度研磨して、7. 6 mm × 5. 0 mm × 0. 3 3 mm の形状に鏡面仕上げし、表裏両面の（1 1 1）面に反射防止膜を蒸着した。そして、1. 0 mm × 1. 2 mm × 0. 3 3 mm に切断し、最後に（1 1 1）面と（-1 1 0）面と（-1-12）面の交点を少し削って方位の目印とした。最終的なガーネット単結晶の形状及び面を図 5 の D に示す。振動試料型磁力計（V S M）によりガーネット単結晶の飽和に要する磁界を測定したところ 1 2 0 エルステッドであったため、永久磁石による固定磁界を 1 5 0 エルステッドに設定して、ガーネット単結晶を飽和させるようにした。そして、光がガーネット単結晶の反射防止膜を蒸着した面、即ち（1 1 1）面に対して垂直に入射するようにして測定を行った。このガーネット単結晶の磁化が光線と平行方向を向いたときのファラデー回転角は約 3 2 度である。（なお、結晶の面及び方位を表す表記法では、負の指数についてはその数値の上に横棒を引いて表すが、本明細書ではそれができないために指数にマイナス符号を付して表記している。）

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0 0 3 4

【補正方法】変更

【補正内容】

【0 0 3 4】ファラデー素子となるガーネット単結晶は図 5 に示すような手順で作製した。P b O - B₂ O₃ - B i₂ O₃ を融剤とし、L P E 法により、格子定数が 1 2. 4 9 6 Å、組成が (C a G d)₃ (M g Z r G a)₅ O₁₂ である直径 3 インチ、厚み 1 1 7 0 μ m の基板の（1 1 1）面上に、B i 置換希土類鉄ガーネット単結晶（L P E 膜、組成 T b_{1.00} Y_{0.65} B i_{1.35} F e_{4.05} G a_{0.95} O₁₂、膜厚 4 5 0 μ m）を育成した。図 5 に示すように、基板には予め大小二つのフラット面が付けられており、大きなフラット面は（-1 1 0）面、小さなフラット面は（1 1 -2）面である。次に、得られた L P E 膜を 7. 6 mm × 5. 0 mm に切断し、研磨により基板を除去した後に、大気中で 1 1 0 0 °C、8 時間熱処理した。これは、成長誘導による一軸磁気異方性定数を低減するためである。その後、再度研磨して、7. 6 mm × 5. 0 mm × 0. 3 5 mm の形状に鏡面仕上げし、表裏両面の（1 1 1）面に反射防止膜を蒸着した。そして、1. 0 mm × 1. 2 mm × 0. 3 5 mm に切断し、最後に（1 1 1）面と（-1 1 0）面と（-1-12）面の交点を少し削って方位の目印とした。振動試料型磁力計（V S M）によりガーネット単結晶の飽和に要する磁界を測定したところ 1 2 0 エルステッドであったため、永久磁石による固定磁界を 1 5 0 エルステッドにして、ガーネット単結晶を飽和させるようにした。そして、光がガーネット単結晶の反射防止膜を蒸着した面、即ち（1 1 1）面に対して垂直に入射するようにして測定を行った。

フロントページの続き

(72) 発明者 中田 英則
東京都港区新橋 5 丁目 36 番 11 号 富士電気
化学株式会社内

(72) 発明者 梅澤 浩光
東京都港区新橋 5 丁目 36 番 11 号 富士電気
化学株式会社内
(72) 発明者 福島 暢洋
神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番
1 号 富士通株式会社内

